

Traitement du signal pour les communications numériques au travers de canaux radio-mobiles

Laurent ROS

Laboratoire Gipsa-lab, dpt Images-Signal, équipe CICS,
Grenoble-INP, école PHELMA

Soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches, 7 Mars 2016
école doctorale EEATS de l'Université Grenoble Alpes

Sommaire

- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
- 3 Conclusion et Perspectives

Sommaire

- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
- 3 Conclusion et Perspectives

Parcours

- **Juin 1992 : Diplôme d'ingénieur** Supélec, option "Radiocommunications",
- **1992-1993 : Scientifique du contingent** à la DCN/Certel, Toulon
- **1993-1999: Ingénieur Recherche & Développement dans l'industrie**
 - **Centre National d'Etudes des Télécommunications**, à Lannion
 - société **Sodielec** (équipementier Télécom), à Millau
- **1999-2001 : Doctorat** à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, sous la direction de Geneviève Jourdain et Marilyn Arndt (Orange-lab, Meylan),
Titre : *Réception multi-capteur pour un terminal radio-mobile dans un système d'accès multiple CDMA.*
- **2001-2002 : ATER** à l'ENSERG (Electronique et Radio-électricité, Grenoble)
- **2002-présent : Maître de conférences**
 - enseignement à Grenoble-INP, école ENSERG puis PHELMA
 - recherche au **Laboratoire des Images et des Signaux**, puis Gipsa-lab

Encadrement doctoral

Co-encadrement de 7 thèses soutenues, et de 2 thèses en cours:

- **3 thèses internes au laboratoire** (bourses du ministère):

Hussein Hijazi (2008), Jordi Vilà-Valls (2010), Soukayna Ghandour-Haidar (2014),

- **1 thèse en collaboration avec l'université de Lille:**

Huaqiang Shu (2013)

- **5 thèses extérieures (collaboration R&D locale):**

- **CEA-LETI:** Youssef Nasser (2006), Mathieu Des Noes (2015),
Marguerite Marnat, et Yoann Roth,

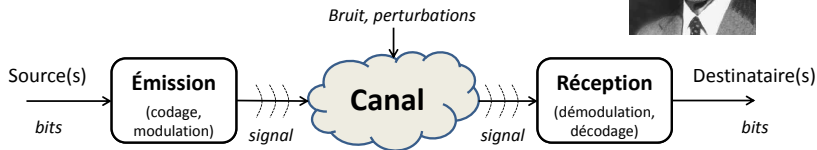
- **STMicroelectronics:** Robin Gerzaguet (2015)

Publications: 24 journaux, 58 conférences, 1 brevet, 1 chapitre de livre

➡ revues de **“Traitement du Signal”** (55 % des articles) ou **“Communications”** (45 %)

Domaine : communication et traitement du signal

Schéma de communication de Claude Shannon, 1948



- objet: transmission d'information de manière fiable
au travers d'un canal donné (caractéristiques, perturbations)
- ➔ définition de schémas d'émission / réception adaptés au contexte
- ➔ estimation des paramètres du canal au niveau du récepteur

Contexte : communication radio-mobile



Exemples d'applications:

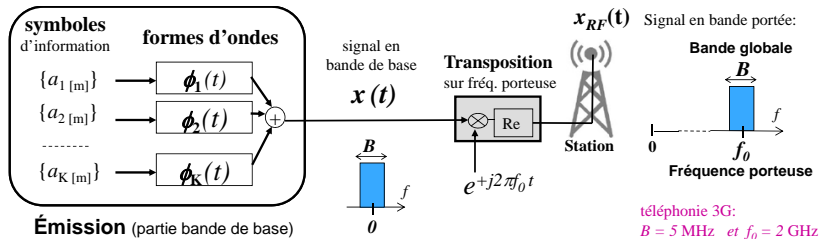
radio-navigation,
radio-diffusion, ...

WIFI mobile (WIMAX)

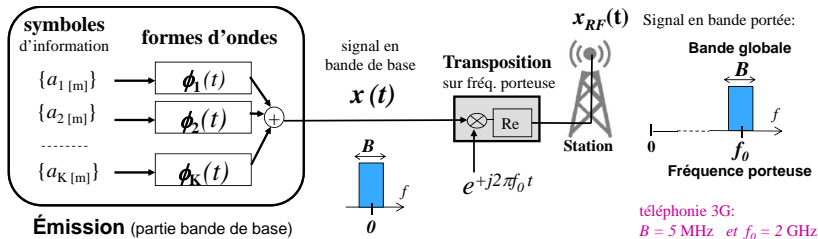
téléphonie mobile (3G, ...),

- ondes **radio**-électriques, avec émetteur ou/et récepteur **mobile** :
 - spécificités systèmes: Bande passante, Puissances, type d'accès multiple, ...
 - canal "riche": échos + évolutions dynamiques (effet Doppler), ...

Modulation (multi-voie, linéaire) sur fréquence porteuse



Modulation (multi-voie, linéaire) sur fréquence porteuse

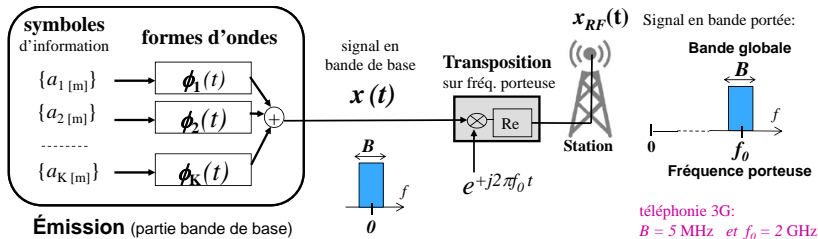


Signal d'information à l'émission (en bande de base)

$$x(t) = a_k \times \phi_k(t) \quad \text{1 symbole, 1 voie}$$

- Temps symbole T_s ,
- Bande B_1 d'une voie, selon forme d'onde $\phi_k(t)$

Modulation (multi-voie, linéaire) sur fréquence porteuse



Signal d'information à l'émission (en bande de base)

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^{+\infty} a_{k[m]} \times \phi_k(t - m \cdot T_s)$$

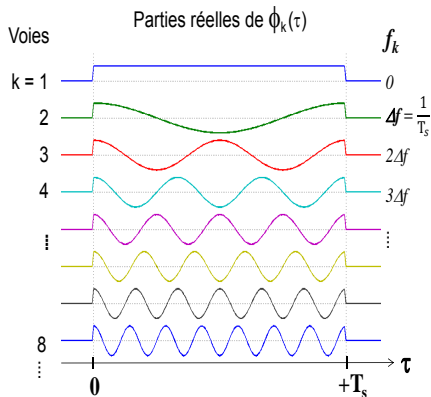
- Temps symbole T_s ,
- Bande B_1 d'une voie, selon forme d'onde $\phi_k(t)$

Symboles successifs: sans interférence (IES) $\Rightarrow B_1 \geq \frac{1}{T_s}$ = bande minimale

K Voies (utilisateurs): sans interférence (IEV) si $\langle \phi_k ; \phi_{k'} \rangle = 0$

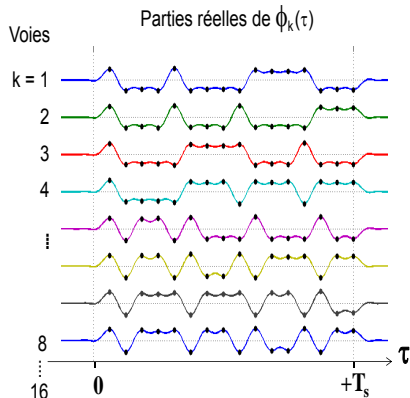
Exemples de Formes d'ondes : OFDM et CDMA

Orthogonal Frequency Division Multiplexing



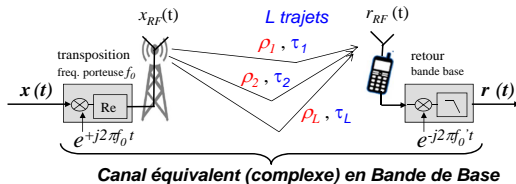
bande 1 voie proche largeur min. ($B_1 \approx \frac{1}{T_s}$)
 occupe fraction B. globale : $B_1 \approx B/K$

Coded Division Multiple Access

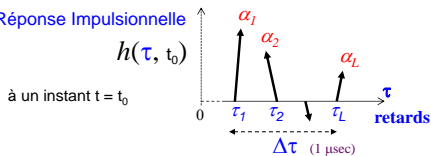


bande 1 voie très large ($B_1 \gg \frac{1}{T_s}$)
 occupe toute la Bande : $B_1 \approx B$

Canal radio-mobile (1): échos ou trajets multiples



Réponse Impulsionnelle



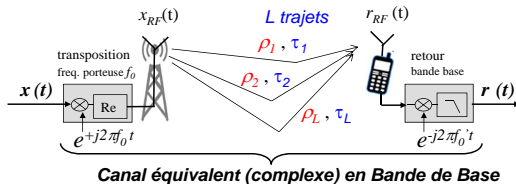
Signal reçu (après retour bande base)

$$r(t) \approx \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \cdot x(t - \tau_l)$$

Pour trajet numéro l :

- retard de propagation: τ_l ,
- amplitude complexe: $\alpha_l = \rho_l \cdot e^{j\theta_l}$,
où $\theta_l(t) \approx -j2\pi f_0 \tau_l(t)$

Canal radio-mobile (1): échos ou trajets multiples



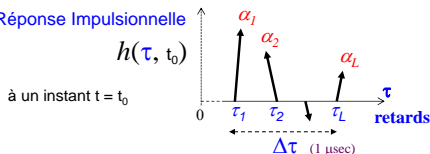
Signal reçu (après retour bande base)

$$r(t) \approx \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \cdot x(t - \tau_l)$$

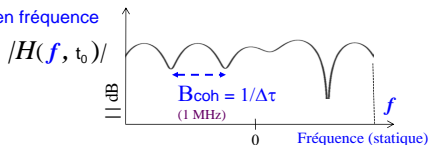
Pour trajet numéro l :

- retard de propagation: τ_l ,
- amplitude complexe: $\alpha_l = \rho_l \cdot e^{j\theta_l}$,
où $\theta_l(t) \approx -j2\pi f_0 \tau_l(t)$

Réponse Impulsionnelle



Réponse en fréquence



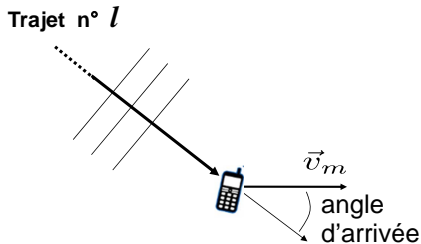
✓ Effet étalement des retards $\Delta\tau$:
 ➔ **distorsion fréquentielle** des formes d'ondes, sauf si $B_1 \ll B_{\text{coh}}$

Canal radio-mobile (2): variation des amplitudes complexes

- fréquence Doppler : $f_d = \frac{v_m}{c} \cdot f_0$ (≈ 1 kHz à $v_m = 500$ km/h en 3G)

Sur déplacement de quelques λ (15 cm en 3G) :

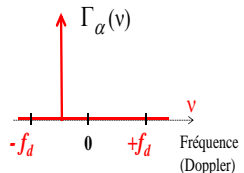
- modèle déterministe (onde plane espace libre) :



- $\alpha_l(t) = \rho_l \cdot e^{j\theta_l(t)}$

$$\theta_l(t) = -2\pi \cdot \underbrace{f_d \cos(\text{angle d'arrivée})}_{\text{décalage}} \times t$$

- Spectre Doppler**

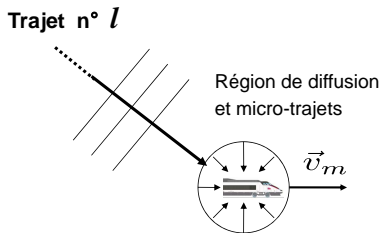


Canal radio-mobile (2): variation des amplitudes complexes

- fréquence Doppler : $f_d = \frac{v_m}{c} \cdot f_0$ (≈ 1 kHz à $v_m = 500$ km/h en 3G)

Sur déplacement de quelques λ (15 cm en 3G) :

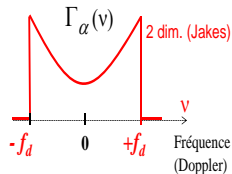
- modèle aléatoire (stationnaire, diffuseurs non corrélés) :



- Loi amplitude complexe:**

$$\alpha_l(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\alpha_l}^2)$$

- Spectre Doppler**

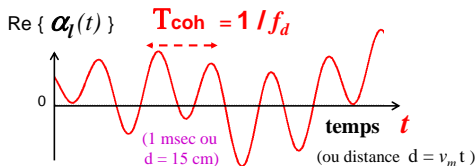


Canal radio-mobile (2): variation des amplitudes complexes

- fréquence Doppler : $f_d = \frac{v_m}{c} \cdot f_0$ (≈ 1 kHz à $v_m = 500$ km/h en 3G)

Sur déplacement de quelques λ (15 cm en 3G) :

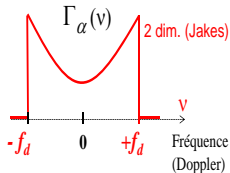
- modèle aléatoire (stationnaire, diffuseurs non corrélés) :



- Loi amplitude complexe:**

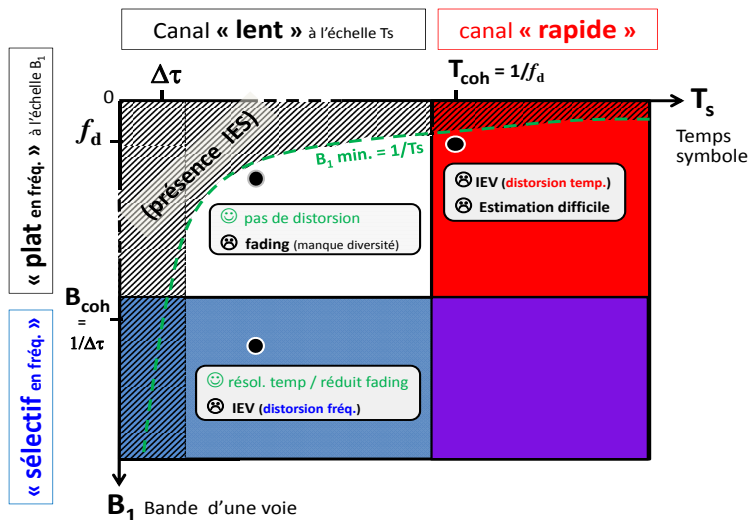
$$\alpha_l(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\alpha_l}^2)$$

- Spectre Doppler**



✓ Effets variation temporelle:

- “fading” (puissance instantanée),
- **distorsion temporelle**, sauf si $T_s \ll T_{coh}$

Types de problèmes à traiter : selon choix T_s et B_1 

Part. I: Etalement de spectre et autres schémas de transmission

T1: Récepteurs CDMA

- **Égalisation** (utilisateurs, trajets) [suite ma thèse]
- **Synchronisation phases/retards** [avec E. Simon]
- **Détection de séquences PN** [thèse M. Des Noes]

T2: Tech. de transmission

- **Tech. de diversité** (pré-codage) [avec A. Khalighi]
- **Accès multiple CDMA-OFDM** [thèse Y. Nasser]
- **Com. à très faible puissance** [thèse Y. Roth]
- **Acoustique Sous Marine** [avec A. Kibangou, C. Siclet]

Part. II: Estimation dynamique Bayésienne de paramètres du canal

T3: Estimateurs pour canaux dynamiques et bornes Bayésiennes

Pour canaux rapides en OFDM [thèse H. Hijazi] :

- **Mod. polynomiale, Bornes Bayésiennes,**
- **Algorithmes** (estimation amplitudes et réjection d'interférences dues au Doppler)

Avec estimation non linéaire ou conjointe

d'offset de fréquence, phases, ampl. , retards :

- **Récepteurs MIMO-OFDM** [avec E. Simon]
- **Récepteurs satellites et récepteurs GSM** [thèse J. Vilà-Valls] [avec H. Abeida, JM Brossier]
- **Terminaux multistandard** [thèse R. Gerzaguet]

T4: Performances asymptotiques et liens boucles / filtres de Kalman

- **Estimation des amplitudes complexes par boucles de poursuite** (CATL, structure \approx PLL), liens avec filtres de Kalman "Random Walk" [avec E. Simon, H. Hijazi]
- **Extension pour boucles / filtres d'ordre 3** (1-trajet et multi trajet OFDM) [thèse H. Shu]
- **Estimation d'un canal à relais mobiles multi-bond par filtre de Kalman Auto-Régressif** [thèse S. Ghandour-Haidar]

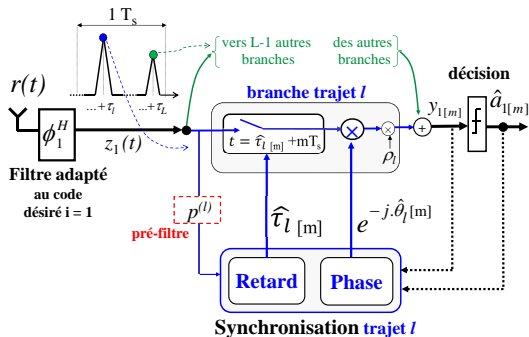
Sommaire

- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
- 3 Conclusion et Perspectives

- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
 - Récepteurs en étalement de spectre CDMA: synchronisation
 - Estimation dynamique : des amplitudes complexes en OFDM (canaux rapides)
 - Performances asymptotiques: boucles de poursuite et filtres de Kalman (canaux lents)
- 3 Conclusion et Perspectives

Synchronisation de retard et de phase en CDMA (2002-2007)

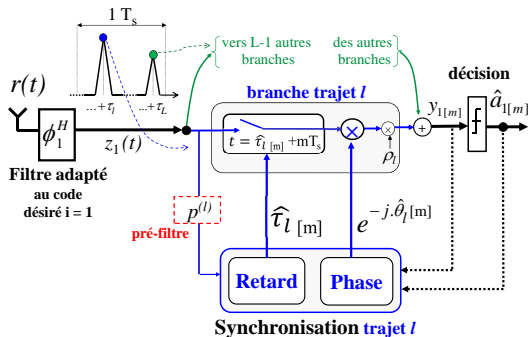
- Collaboration avec E. Simon (Univ. Lille, après thèse Grenoble 2004, dir. K. Raoof)
- Problématique : synchronisation en **contexte multi-utilisateur multi-trajet**, à partir d'algorithmes récurifs standards 1-trajet 1-utilisateur appliqués *par trajet*.



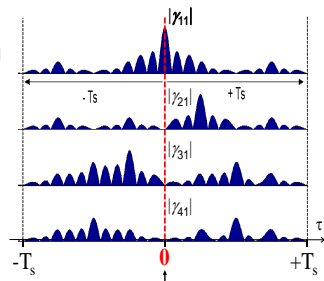
$$\hat{\tau}_{l[m+1]} = \hat{\tau}_{l[m]} + \mu_R \cdot v_{R[m]}; \quad \hat{\theta}_{l[m+1]} = \hat{\theta}_{l[m]} + \mu_P \cdot v_{P[m]}$$

Synchronisation de retard et de phase en CDMA (2002-2007)

- Collaboration avec E. Simon (Univ. Lille, après thèse Grenoble 2004, dir. K. Raoof)
- Problématique : synchronisation en **contexte multi-utilisateur multi-trajet**, à partir d'algorithmes récursifs standards 1-trajet 1-utilisateur appliqués *par trajet*.



Inter-corrélations $\gamma_{k1}(\tau) = \langle \phi_k(t); \phi_1(t-\tau) \rangle$



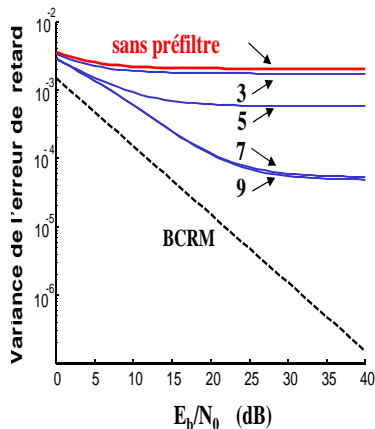
[codes Walsh-Hadamard embrouillé UMTS-TDD, $Q=16$ chips]

$$\hat{\tau}_{l[m+1]} = \hat{\tau}_{l[m]} + \mu_R \cdot v_{R[m]}; \quad \hat{\theta}_{l[m+1]} = \hat{\theta}_{l[m]} + \mu_P \cdot v_{P[m]}$$

➔ **Clef:** Ajout de **préfiltre** dans chemin de synchronisation: **retard** (early-late), **phase**

➔ Diminution variance d'estimation de **retard** (boucle Early-Late)

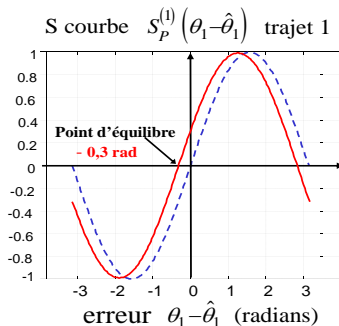
[$K=Q=16$, $L=1$, nb coefficients préfiltre: 0 à 9]



➔ Correction du biais d'estimation de **phase** (boucle à remodulation)

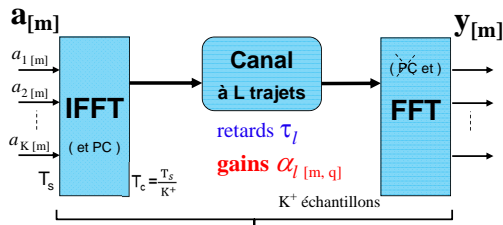
[$L=4$ trajets, retards connus $\frac{\tau_l}{T_c} = 0, 0.5, 1.5, 2.5$]

Caractéristique du Détecteur d'erreur: **sans** et **avec** préfiltre



- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
 - Récepteurs en étalement de spectre CDMA: synchronisation
 - **Estimation dynamique : des amplitudes complexes en OFDM (canaux rapides)**
 - Performances asymptotiques: boucles de poursuite et filtres de Kalman (canaux lents)
- 3 Conclusion et Perspectives

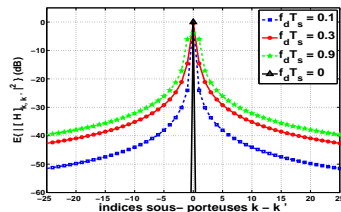
Modèle émission-réception OFDM, selon mobilité



Symboles estimés après FFT
(K voies ou sous-porteuses) :

$$\mathbf{y}[m] = \mathbf{H}[m] \mathbf{a}[m] + \mathbf{w}[m]$$

$$[\mathbf{H}[m]]_{k,k'} = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^L \left[e^{-j2\pi \left(\frac{k'-1}{K} - \frac{1}{2} \right) \frac{\tau_l}{T_c}} \sum_{q=0}^{K-1} \alpha_l[m, q] e^{j2\pi \frac{k'-k}{K} q} \right]$$



- matrice $\mathbf{H}[m] = \text{diag}\{\mathbf{h}[m]\}$ si canal varie peu durant T_s ,

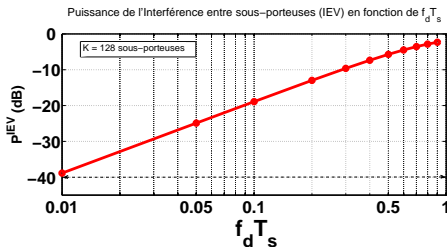
$$\text{où } \mathbf{h}[m] = \mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\alpha}[m] \text{ avec } [\mathbf{F}]_{k,l} = e^{-j2\pi \left(\frac{k-1}{K} - \frac{1}{2} \right) \frac{\tau_l}{T_c}}$$

- sinon $\mathbf{H}[m]$ non diagonale (\Rightarrow IEV),

Ordres de grandeurs des vitesses critiques selon systèmes

$f_d T_s$	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	5.10^{-1}
WiMax (3.5 GHz)	3 km/h	33 km/h	337 km/h	500 km/h
LTE (2.6 GHz)	6 km/h	62 km/h	623 km/h	950 km/h
LTE (900 MHz)	18 km/h	180 km/h	1800 km/h	2700 km/h

Interférence entre sous-porteuses (IEV)



fréquence Doppler normalisée
(par T_s = durée d'un symbole OFDM)

Estimation pour canaux rapides (2005-2012)

- Travaux initiés par la thèse de H. Hijazi (Bornes et algo. estimation/réduction IEV)
- Principe général = processus itératif (basé sur pilotes puis décisions $\hat{\mathbf{a}}_{[m]}$) entre:
 - 1 Estimation de canal (supposant τ_l fixes et connus):
 - **estimation** $\hat{\alpha}_{[m]} \Rightarrow$ nombreux paramètres ($K \times L$)
 - construction de $\hat{\mathbf{H}}_{[m]}$
 - 2 Décision avec Egalisation à soustraction d'interférence (reconstruite)

➔ **Modélisation polynomiale**, et **Algorithmes de reconstruction de $\hat{\alpha}_{[m]}$** :

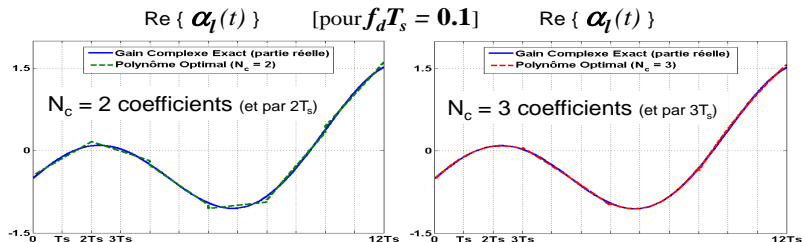
- Algo. basé sur moyennes $\overline{\alpha}_{[m]}$ estimées ($0.01 \leq f_d T_s \leq 0.1$)

H. Hijazi, L. Ros, "Polynomial Estimation of Time-Varying Multipath Gains With Inter-carrier Interference Mitigation in OFDM Systems", IEEE Trans. on Vehicular Tech., 2009

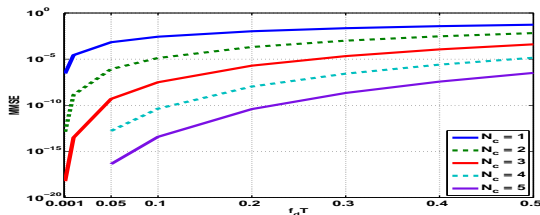
- Algo. basé sur l'estimation des coefficients polynomiaux ($f_d T_s \geq 0.1$)

H. Hijazi, L. Ros, "Joint Data QR-Detection and Kalman Estimation for OFDM time-varying Rayleigh Channel Complex Gains", IEEE Trans. on Communications, 2010

Modélisation polynomiale des amplitudes complexes



EQM théorique de l'approximation polynomiale (sur $1T_s$) versus $f_d T_s$ (modèle 2D)



Algorithme : polynômes, processus AR, et Kalman

- Filtre de Kalman basé sur :
 - Modèle d'observation** : approx. polynomiale (N_c coeff./trajet):

$$\mathbf{y}_{[m]} \approx \mathbf{D}_{[m]} \mathbf{c}_{[m]} + \mathbf{w}_{[m]}$$

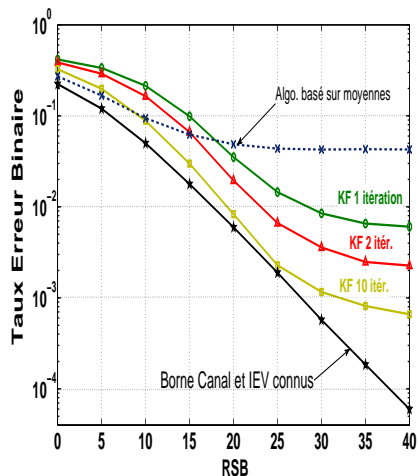
- Modèle d'état** : approximation Auto-Régressive d'ordre r de la dynamique des coefficients:

$$\tilde{\mathbf{c}}_{l[m]} = - \sum_{i=1}^r \mathbf{A}_l^{(i)} \tilde{\mathbf{c}}_{l[m-i]} + \mathbf{u}_{l[m]}$$

Performances pour $f_d T_s = 0.3$

($N_c = 3$ coef., AR $r=1$, égaliseur QR)

[taux de pilotes : 1/4, K = 128 sous-porteuses, L=6 trajets]



Algorithme : polynômes, processus AR, et Kalman

- Filtre de Kalman basé sur :
 - Modèle d'observation** : approx. polynomiale (N_c coeff./trajet):

$$\mathbf{y}_{[m]} \approx \mathbf{D}_{[m]} \mathbf{c}_{[m]} + \mathbf{w}_{[m]}$$

- Modèle d'état** : approximation Auto-Régressive d'ordre r de la dynamique des coefficients:

$$\tilde{\mathbf{c}}_{l[m]} = - \sum_{i=1}^r \mathbf{A}_l^{(i)} \tilde{\mathbf{c}}_{l[m-i]} + \mathbf{u}_{l[m]}$$

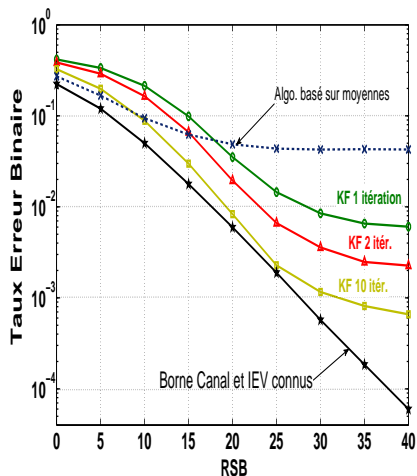
- Extensions : estimation conjointe de canal et d'offset de fréquence (bornes hybrides, EM, Kalman étendu)

E.Simon, L. Ros, H. Hijazi, M. Ghogho, "Joint carrier frequency offset and channel estimation for OFDM systems via the EM algorithm in the presence of very high mobility", IEEE Trans. on Signal Processing, 2012

Performances pour $f_d T_s = 0.3$

($N_c = 3$ coef., AR $r=1$, égaliseur QR)

[taux de pilotes : 1/4, K = 128 sous-porteuses, L=6 trajets]



- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
 - Récepteurs en étalement de spectre CDMA: synchronisation
 - Estimation dynamique : des amplitudes complexes en OFDM (canaux rapides)
 - **Performances asymptotiques: boucles de poursuite et filtres de Kalman (canaux lents)**
- 3 Conclusion et Perspectives

Etudes pour canaux lents (2009-2015): Motivations

- Estimation des A.C. en OFDM \Rightarrow **canal lent** : $\mathbf{H}_{[m]}$ diagonale, pas d'IEV
- Kalman de référence "direct" sur modèle d'observation : $\mathbf{y}_{[m]} = \mathbf{D}_{[m]}\boldsymbol{\alpha}_{[m]} + \mathbf{w}_{[m]}$
 - reste complexe : $\mathcal{O}(K^3 + K^2L(r+1))$
 - perf. loin des bornes avec modèle d'état AR d'ordre $r \leq 3$,
réglé par critère de coïncidence de corrélation
- **Objectif** : algorithmes + performants et + simples

Etudes pour canaux lents (2009-2015): Motivations

- Estimation des A.C. en OFDM => **canal lent** : $\mathbf{H}_{[m]}$ diagonale, pas d'IEV
- Kalman de référence "direct" sur modèle d'observation : $\mathbf{y}_{[m]} = \mathbf{D}_{[m]}\boldsymbol{\alpha}_{[m]} + \mathbf{w}_{[m]}$
 - reste complexe : $\mathcal{O}(K^3 + K^2L(r+1))$
 - perf. loin des bornes avec modèle d'état AR d'ordre $r \leq 3$,
réglé par critère de coïncidence de corrélation
- **Objectif** : algorithmes + performants et + simples

➔ Clefs :

- **Modèle d'état** approchant l'*a priori*: adéquat et bien réglé ➔ critère variance

$$\text{ex: } \gamma_{AR(1)} = J_0(2\pi f_d T_s) \Rightarrow \sqrt{1 - 4 \left[(\pi f_d T_s)^4 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_\alpha^2} \right]^{\frac{1}{3}}}$$

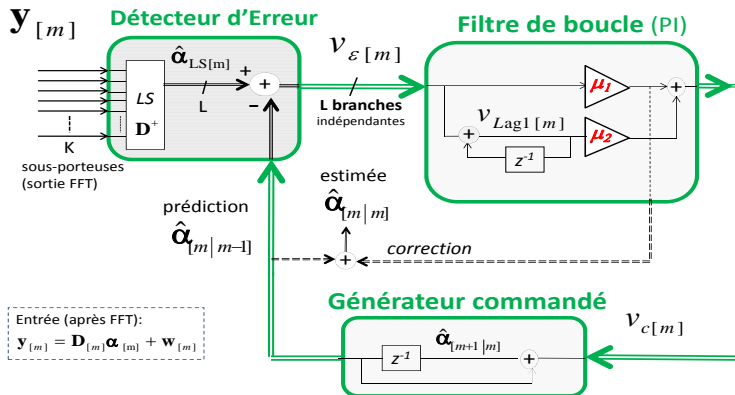
S. Ghandour-Haidar, L. Ros, J.M. Brossier, "On the use of first-order autoregressive modeling for Rayleigh flat fading channel estimation with Kalman filter", Elsevier Signal Processing, 2012

- **Structure**: Tête commune + Traitements parallèles par trajet: $\mathcal{O}(KL)$

H. Shu, L. Ros, E. Simon, "Simplified Random-Walk-Model-Based Kalman Filter for Slow to Moderate Fading Channel Estimation in OFDM Systems", IEEE Trans. on Signal Processing, 2014.

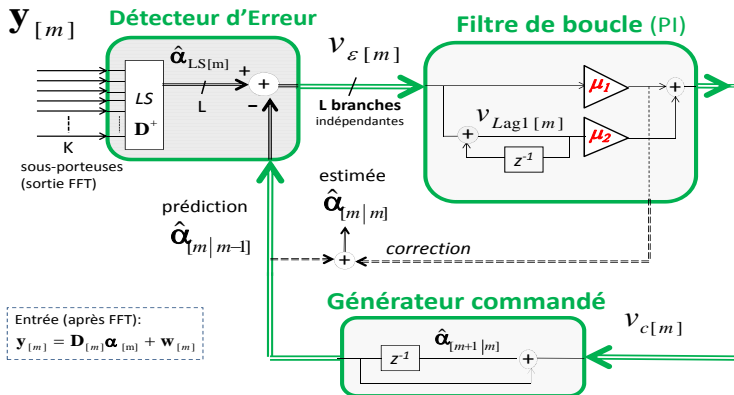
- **Coefficients constants** (en mode de poursuite), \neq mise à jour gain de Kalman

Boucle de poursuite des amplitudes complexes (CATL, $r = 2$)



L. Ros, H. Hijazi, E. Simon, "Complex Amplitudes Tracking Loop for multipath channel estimation in OFDM systems under slow to moderate fading", Elsevier Signal Processing, 2014

Boucle de poursuite des amplitudes complexes (CATL, $r = 2$)



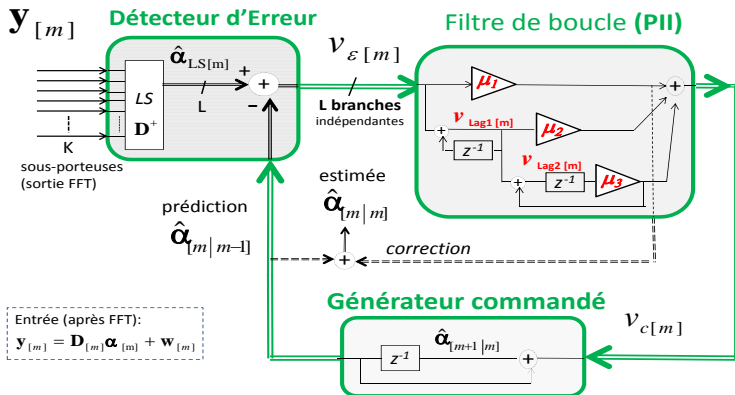
Correction:

$$\hat{\alpha}_{[m|m]} = \hat{\alpha}_{[m|m-1]} + \underbrace{\mu_1 \cdot v_{\epsilon}[m]}$$

Prédiction:

$$\hat{\alpha}_{[m+1|m]} = \hat{\alpha}_{[m|m]} + \underbrace{\mu_2 \cdot v_{Lag1}[m]}$$

Boucle de poursuite des amplitudes complexes (CATL, $r = 3$)



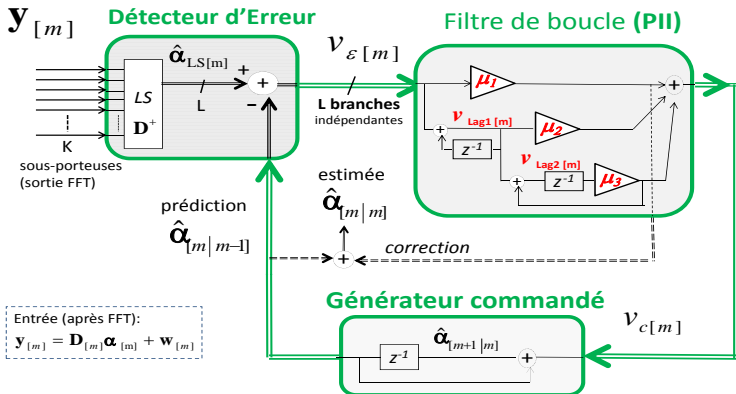
Correction:

$$\hat{\alpha}_{[m|m]} = \hat{\alpha}_{[m|m-1]} + \underbrace{\mu_1 \cdot v_{\epsilon}[m]}$$

Prédiction:

$$\hat{\alpha}_{[m+1|m]} = \hat{\alpha}_{[m|m]} + \underbrace{\mu_2 \cdot v_{Lag1}[m] + \mu_3 \cdot v_{Lag2}[m-1]}$$

Boucle de poursuite des amplitudes complexes (CATL, $r = 3$)



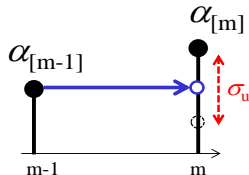
réglage: (μ_1, μ_2, μ_3) ou (f_n, ζ, R_c) ; critère: $\min E\{\|\alpha_{[m]} - \hat{\alpha}_{[m|m]}\|^2\}$

Pour 1 trajet l : filtre de Kalman Random-Walk \longrightarrow CATL $m \gg 1$

$r = 1$

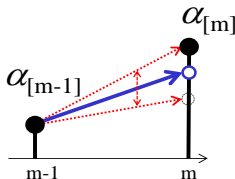
$$\alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + u_{[m]}$$

avec $u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_u^2)$



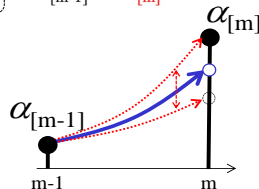
$r = 2$

$$\begin{cases} \alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + \dot{\alpha}_{[m-1]} \\ \dot{\alpha}_{[m]} = \dot{\alpha}_{[m-1]} + u_{[m]} \end{cases}$$



$r = 3$

$$\begin{cases} \alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + \dot{\alpha}_{[m-1]} + \frac{1}{2} \ddot{\alpha}_{[m-1]} \\ \dot{\alpha}_{[m]} = \dot{\alpha}_{[m-1]} + \ddot{\alpha}_{[m-1]} \\ \ddot{\alpha}_{[m]} = \ddot{\alpha}_{[m-1]} + u_{[m]} \end{cases}$$



L. Ros, E. Simon, "Second-order modeling for Rayleigh flat fading channel estimation with Kalman filter", 17th IEEE international conference on Digital Signal Processing, Corfu, GREECE, July 2011

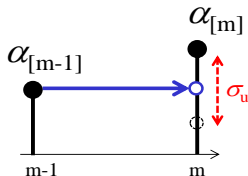
H. Shu, E. Simon, L. Ros, "Third-order Kalman Filter : tuning and steady-state performance", IEEE Signal Processing Letter, 2013

Pour 1 trajet l : filtre de Kalman Random-Walk $\xrightarrow{m \gg 1}$ CATL

$r = 1$

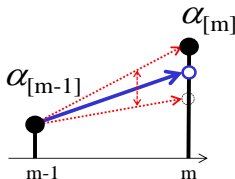
$$\alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + u_{[m]}$$

$$\text{avec } u \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_u^2)$$



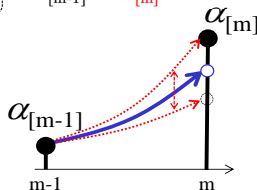
$r = 2$

$$\begin{cases} \alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + \dot{\alpha}_{[m-1]} \\ \dot{\alpha}_{[m]} = \dot{\alpha}_{[m-1]} + u_{[m]} \end{cases}$$



$r = 3$

$$\begin{cases} \alpha_{[m]} = \alpha_{[m-1]} + \dot{\alpha}_{[m-1]} + \frac{1}{2} \ddot{\alpha}_{[m-1]} \\ \dot{\alpha}_{[m]} = \dot{\alpha}_{[m-1]} + \ddot{\alpha}_{[m-1]} \\ \ddot{\alpha}_{[m]} = \ddot{\alpha}_{[m-1]} + u_{[m]} \end{cases}$$



Kalman RW en mode de poursuite (gain $[k_1[m], k_2[m], k_3[m]]^T \xrightarrow{m \gg 1} [k_1, k_2, k_3]^T$):

- **eq. filtrage** $\xrightarrow{} \text{CATL}$ avec $\mu_1 = k_1$, $\mu_2 = k_2 + \frac{1}{2}k_3$, $\mu_3 = k_3$,
 - **eq. Ricatti** (cas lent): $k_1 \approx 2(\frac{\sigma_u}{\sigma_{w_{LS}}})^{\frac{1}{3}}$, $k_2 \approx k_1^2/2$, $k_3 \approx k_1^2/8$
- $\rightarrow \text{CATL}(\zeta \approx \frac{1}{2}, \text{Rc} \approx 2)$ à fréquence naturelle $f_n T_s = \frac{k_1}{\pi}$ réglable par σ_u .

Performance et réglages des CATLs: formules explicites

\forall spectre Doppler, fonction de $S_\alpha = \int \Gamma_\alpha(f) f^{2r} df \propto f_d^{2r}$ pour 2D(Jakes) ou 3D

Performance et réglages des CATLs: formules explicites

\forall spectre Doppler, fonction de $S_\alpha = \int \Gamma_\alpha(f) f^{2r} df \propto f_d^{2r}$ pour 2D(Jakes) ou 3D

Variance d'estimation CATL ordre $r=1,2$, ou 3 (spectre Doppler 2D ou 3D)

$$\sigma_{\epsilon}^2 \text{ (2D ou 3D)} \approx \text{const}_r \cdot (\sigma_\alpha^2/L)^{\frac{1}{2r+1}} \cdot (\textcolor{red}{f_d} T_s \times \sigma_{\textcolor{blue}{LS}}^2)^{\frac{2r}{2r+1}}$$

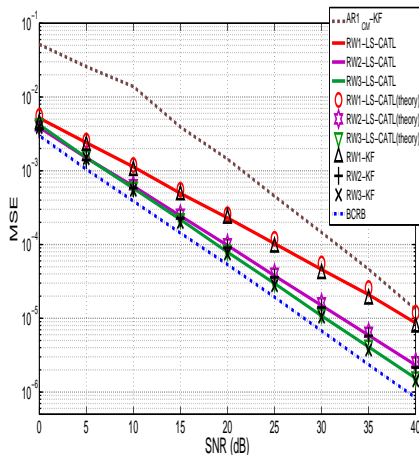
$$\text{obtenu avec } f_n T_s = \text{const}'_r \cdot (\sigma_\alpha^2/L)^{\frac{1}{2r+1}} \cdot (f_d T_s)^{\frac{2r}{2r+1}} \times (\frac{1}{\sigma_{\textcolor{blue}{LS}}^2})^{\frac{1}{2r+1}}$$

- **Bruit de boucle** $\sigma_{\textcolor{blue}{LS}}^2 = \lambda \cdot \frac{\sigma_w^2}{K}$, dépend de la **distribution des retards** τ_l ,

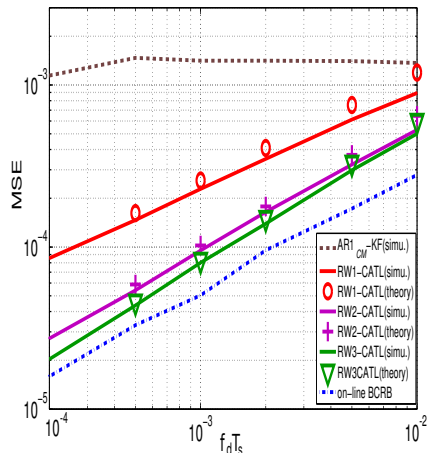
$$\text{avec } \lambda = \frac{K}{L} \cdot \text{Trace} \{ (\mathbf{F}^H \mathbf{F})^{-1} \} \geq 1 \quad \text{et} \quad [\mathbf{F}]_{k,l} = e^{-j2\pi(\frac{k-1}{K} - \frac{1}{2}) \frac{\tau_l}{T_c}}$$

Courbes de variance d'estimation asymptotique

pour $f_d T_s = 10^{-3}$



pour SNR = 20 dB



pour canal L=6 trajets, spectre Doppler 2D, $K = 128$ s.p., $K_p = 16$ pilotes

Sommaire

- 1 Contexte des activités de recherche, et vue d'ensemble des travaux
- 2 Focus sur quelques contributions
- 3 Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Couche physique des com. sans fil en mobilité: domaine très vaste.
- Contributions ciblées:
 - **schémas d'émission-réception** : CDMA et ses dérivées ...
 - **estimation dynamique de canal** ➔ Analyse théorique (brique de base)
 - bornes de Cramer-Rao Bayésiennes,
 - optimisation : réglage et ordre **modèle d'état** des estimateurs vs paramètres **modèle physique** (Doppler, Bruit de phase, décalages fréquences porteuse/horloge),
 - formules explicites: filtres de Kalman (1960) et boucles PLL (1930) revisités
- Collaborations principales :
 - **universités** (Gipsa-lab, Univ. Lille, Univ. Libanaises)
 - **centre de recherches technologique** :
 - LETI (labo "Com. Num. Algo": M. Des Noes, V. Savin, ...).
 - ST (Fabrice Belveze, ...).

Perspectives à l'estimation de canal et compensation

- Extension des formules explicites de performances/réglages des algorithmes de poursuite (boucles, LMS, Kalman) en canal lent (1 bond ou multi-bond) :
 - autres modèles d'états que RW1,2,3 ou $AR(1) \Rightarrow AR(p)$ pour $p \geq 2$, ...
 - autres modèles d'observations: canal rapide, ...
- Réglage auto-adaptatif des algorithmes (sans *a priori* sur l'état du canal)
- Extensions des études à d'autres champs d'application :
formes d'onde 5G ("generalized OFDM"), ...

En s'éloignant :

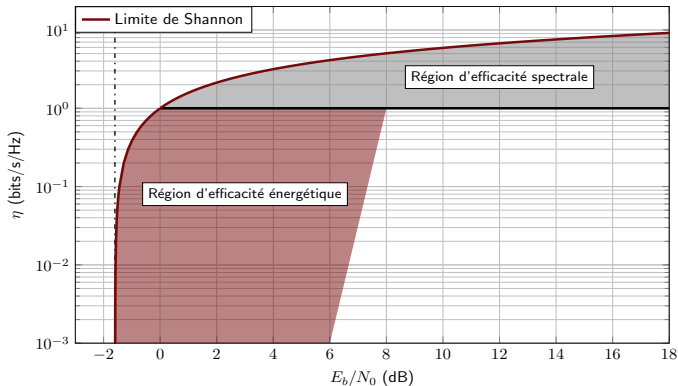
- Exploitation des formules: prise en compte erreurs d'estimation de canal dans calcul de capacité (allocation ressources, sélection de noeuds en com. coopérative),
- Optimisation codage/décodage selon dynamique du canal, et perf. estimation

Perspectives aux schémas de transmissions

Travaux en perspective avec le LETI

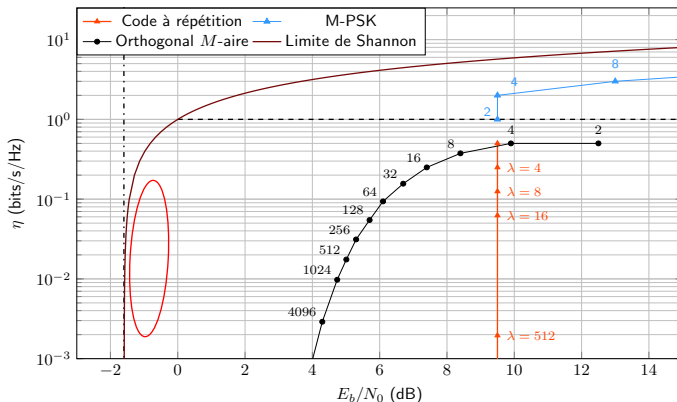
- Enjeux sociétaux (“**Green Telecom**”): limiter l’impact sur l’environnement
 - ➔ **consommation en énergie des équipements**
 - ➔ **pollution électromagnétique** (énergie rayonnée)
 - Ex: “Massive MIMO” sur station de base (focalisation énergie par retournement temporel)
- thèse potentielle sur antennes agiles (B. Miscopein), + 2 axes déjà démarrés

➡ Schéma de transmission à faible énergie par bit reçue



- contextes: objets communicants, réseau Longue portée, réseau de capteurs
- noeud bas débit, **efficacité énergétique vs spectrale** ?
- thèse LETI Yoann Roth (J.B. Doré, V. Berg): émission noeud/réception S.B.
 - ➡ Mod. non linéaire à dictionnaire \perp (FSK) + principe turbo

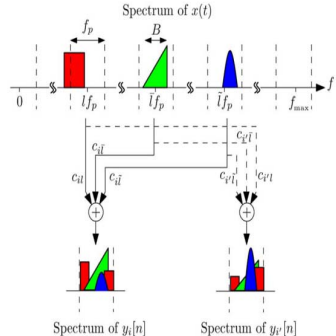
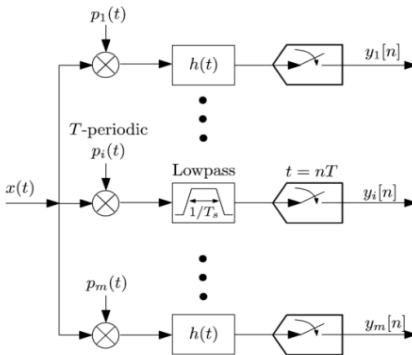
➡ Schéma de transmission à faible énergie par bit reçue



- contextes: objets communicants, réseau Longue portée, réseau de capteurs
- noeud bas débit, **efficacité énergétique vs spectrale** ?
- thèse LETI Yoann Roth (J.B. Doré, V. Berg): émission noeud/réception S.B.
 - ➡ Mod. non linéaire à dictionnaire \perp (FSK) + principe turbo

➔ Acquisition parcimonieuse dans les récepteurs RF

- thèse LETI Marguerite Marnat (M. Pelissier, D. Morche, O. Michel)
- contexte: récepteur “intelligent” sondant l’environnement (bandes occupées, interférent ?)
- ➔ principe de l'échantillonnage parcimonieux (“Analog to Information Converter”)



“Modulated Wideband Converter” [Mishali, 2010]

Merci de votre attention!